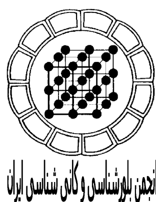
مجله
بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

مقاله پژوهشی

سال سی‌ام، شمارهٔ اول، بهار ۱۴۰۱، از صفحهٔ ۱۰۳ تا ۱۱۸



زمین شیمی و کانه‌زایی پهنه کانسنگ یال شرقی در کانسار روی-سرب- باریت مهدی‌آباد، استان یزد

سیما مهرداد[۱]، زهرا بنیادی*[۱]، مهدی حسینی[۱]، مرضیه بیاتی[۲]

۱- دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، دانشکده علوم پایه، گروه زمین شناسی، قزوین، ایران
۲- شرکت پیشگامان صنعت سرب و روی مهدی‌آباد، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۲/۱۵، نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۵/۲۳)

چکیده: کانسار روی – سرب – باریت مهدی‌آباد در پهنه ساختاری ایران مرکزی و ۱۱۶ کیلومتری جنوب شرقی یزد قرار دارد. سنگ میزبان کانسار، سنگ آهک دولومیتی سازند تفت به سن کرتاسه پیشین است. مهمترین کانه‌های اقتصادی در پهنه کانسنگ یال شرقی کانسار مهدی‌آباد، همی‌مورفیت، هیدروزینسیت، سروزیت و کالکوفانیت هستند. بافت کانسنگ بیشتر جانشینی، برشی و پرکننده فضای خالی است. در اثر فرآیندهای برونزایی و هوازدگی، کانی‌های سولفیدی اسفالریت و گالن به کانی‌های غیرسولفیدی همی‌مورفیت، هیدروزینسیت و سروزیت تبدیل شده‌اند. نتایج تجزیه شیمیایی نشان می‌دهد که عناصر موجود در کانسنگ به سه گروه عناصر خاکزاد، سازنده سنگ میزبان و کانسنگ‌ساز تقسیم می‌شوند. تشکیل دولومیت‌های غنی از آهن، آنکریت و سیدریت، غلظت بالای عناصر آهن و منگنز در سیال کانه‌زا را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج بررسی‌های انجام شده، کانسار مهدی‌آباد، بسیار شبیه کانسارهای نوع دره می‌سی‌سی‌پی است.

واژه‌های کلیدی: زمین شیمی؛ *خاستگاه؛ کانسنگ یال‌شرقی؛ کانسار سرب و روی مهدی‌آباد؛ نوع دره می سی سی پی؛ یزد؛ ایران مرکزی.*

مقدمه

کانسار روی – سرب – باریت مهدی‌آباد که از بزرگترین ذخایر روی در ایران است، در ۱۱۶ کیلومتری جنوب شرقی شهر یزد، ۳۰ کیلومتری جنوب شرق شهر مهریز و ۲۰ کیلومتری شمال شرق روستای مهدی‌آباد قرار دارد. توده معدنی از سه توده کانه‌دار اصلی سولفیدی – غیر سولفیدی تشکیل شده است. در بخش شمال غربی کانسار اصلی، در دامنه کوه معدن کالامین وجود دارد که کاملاً غیر سولفیدی است. این بخش توسط گسل‌ها از بخش اصلی کانسار جدا گردیده است [۱]. مقدار ذخیره این کانسار ۲۸۰ میلیون تن با عیار ۷/۷ درصد روی و ۰/۲ درصد سرب است [۲]. ناحیه مورد بررسی بخشی از گستره نقشه چار گوش یزد در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ [۳] بوده و در گستره طول جغرافیای ′۵۶ °۵۴ تا ′۰۱ °۵۵ شرقی و عرض جغرافیایی ′۲۷ °۳۱ تا ′۳۰ °۳۱ شمالی واقع است. پژوهش‌های مختلفی بر کانسار مهدی‌آباد انجام شده [۱، ۴-۹] که بیشتر پیرامون جنبه‌های چینه‌شناختی، زمین‌ساختی و کانی‌شناسی کل کانسار متمرکز بوده‌اند و بر پهنه کانسنگ یال شرقی کانسار بررسی تفصیلی انجام نشده است. با توجه به تفاوت‌های موجود میان بخش‌های مختلف کانسار از نظر کانی‌شناسی و ویژگی‌های زمین شیمیایی، تمرکز بر هر یک از این بخش‌ها می‌تواند در روشن شدن عوامل موثر بر کانه‌زایی نقش مهمی داشته باشد.

زمین‌شناسی منطقه

کانسار مهدی‌آباد از نظر زمین ساختی، در بخش مرکزی ایران مرکزی، نزدیک به کمربند آتشفشانی کرانه غربی ایران مرکزی،

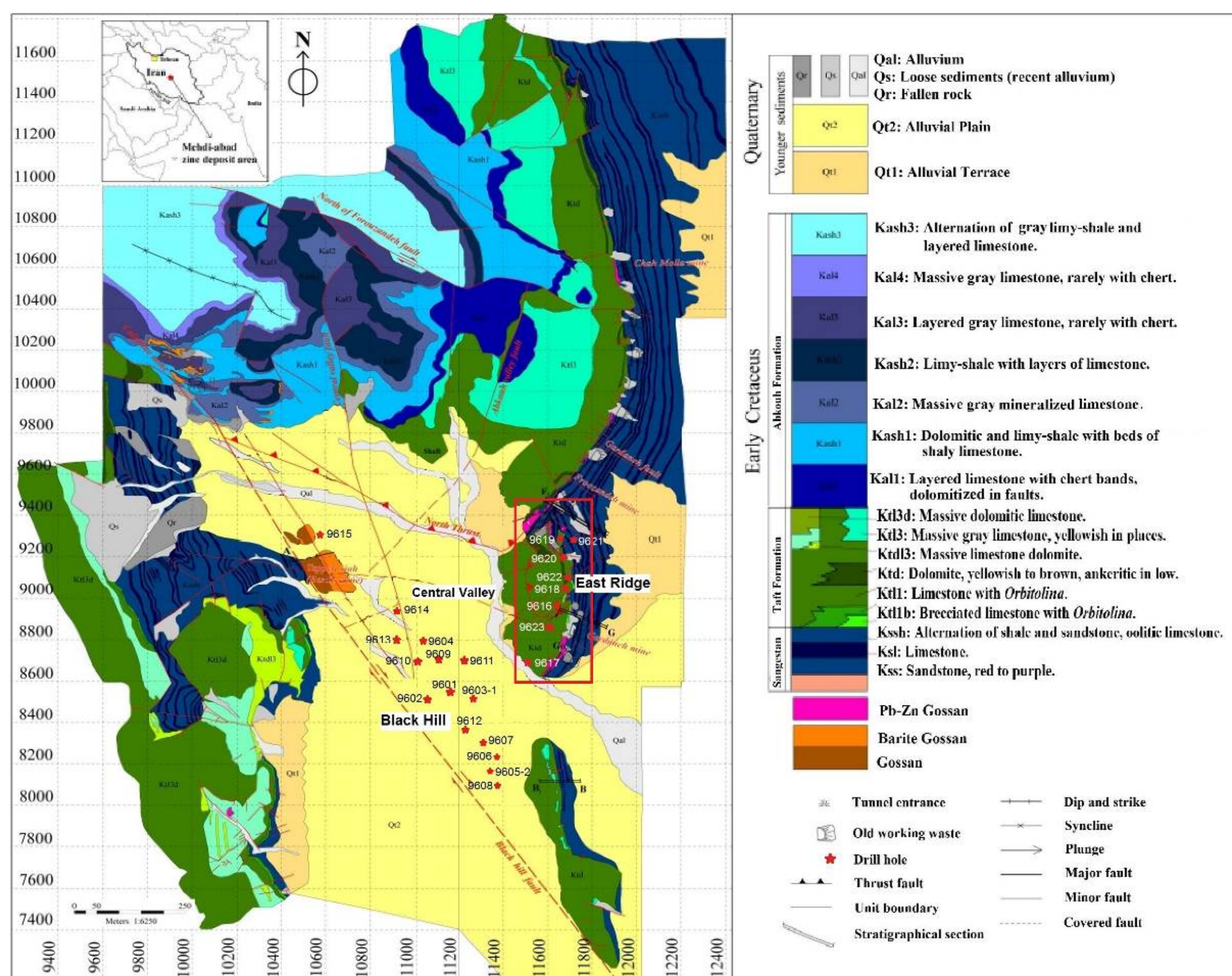
*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۲۸۳۳۹۰۱۳۱۵، نمابر: ۰۲۸۳۳۷۸۰۰۴۰، پست الکترونیکی: bonyadi@sci.ikiu.ac.ir

[DOI: 10.52547/ijcm.30.1.103]

در جنوب شرقی یزد و در بخش جنوبی کمربند فلززایی یزد – انارک قرار دارد [۱۱،۱۰]. کانسار روی – سرب - باریت مهدی‌آباد از نظر موقعیت زمین‌شناسی در سنگ‌های رسوبی کرتاسه پیشین ایران مرکزی واقع است. ردیف‌های سه گانه کرتاسه پیشین ایران مرکزی تاکنون به صورت رسمی نامگذاری نشده‌اند، با این وجود در ناحیه تفت – یزد، به رسوب‌های تخریبی پایه، سنگ آهک‌های اربیتولین‌دار میانی و شیل‌های آلبین به ترتیب نام‌های غیررسمی سازند سنگستان، سازند تفت و سازند دره زنجیر (آبکوه) داده شده است [۳].

از نظر ساختاری، منطقه معدنی مهدی‌آباد به‌صورت یک ناودیس باز با روند شمالی ـ جنوبی و میل محوری به سمت جنوب است. در حالت کلی، دو گسل اصلی با روندهای شمال غرب ـ جنوب شرق و شمالی ـ جنوبی به نام گسل‌های تپه سیاه و دره مرکزی که هر دو عادی با مؤلفه راستالغز هستند، باعث فروافتادگی و جابجایی افق‌های رسوبی و معدنی در دشت مرکزی کانسار مهدی‌آباد شده‌اند، به‌طوری که یک ساختار فروزمین را نشان می‌دهند [۱]. در منطقه مهدی‌آباد، ۹ گسل اصلی بیشتر با روند شمال غربی- جنوب شرقی وجود دارد (شکل ۱). گسل‌های متعدد کوچکتری نیز با روند شمال شرقی- جنوب غربی در منطقه شناسایی و گزارش شده‌اند [۶،۱].

کارشناسان شرکت فرانسوی BRGM توده معدنی کانسار مهدی‌آباد را به سه بخش: کانسنگ نوع غربی (تپه سیاه)، کانسنگ نوع دره مرکزی و کانسنگ نوع شرقی تقسیم کرده‌اند (شکل ۲)، که ویژگی‌های کانی‌شناسی، دگرسانی و زمین شیمیایی آن‌ها تا حدی متفاوت است [۱] که در ادامه توضیح داده می‌شود.



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی کانسار مهدی‌آباد و موقعیت پهنه کانسنگ یال شرقی، دره مرکزی و تپه سیاه. مستطیل قرمز مربوط به شکل ۳ است [۱].

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.1.8.2]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.1.103]



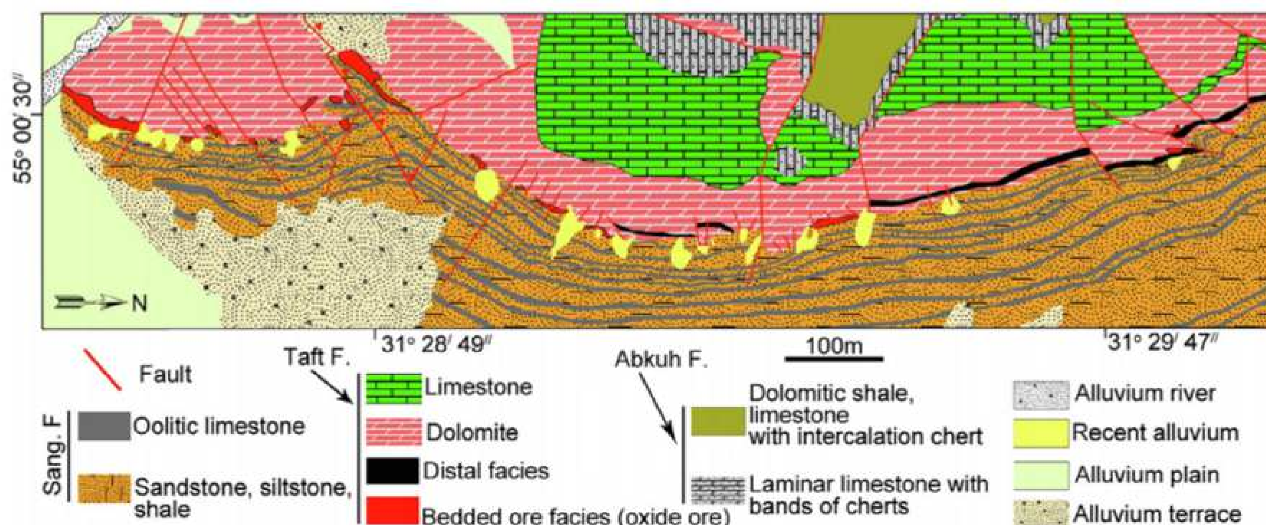
شکل ۲ نمایی از کانسار مهدی‌آباد، شامل افق کانسنگ یال شرقی، افق کانسنگ نوع تپه سیاه و افق کانسنگ دره مرکزی، دید به سمت جنوب شرق.

افق کانسنگ یال شرقی کانسنگ نوع شرقی کانسار مهدی‌آباد به صورت لایه‌ای با ضخامت متغیر از ۲۰ تا ۴۰ متر، در بخش پائینی سازند تفت واقع است [۵] (شکل ۳). کانی‌زایی در این بخش که در لبه ناودیس شرقی کانسار مهدی‌آباد قرار دارد، به صورت چینه کران است که در بخش بالایی شامل کلاهک آهنین هماتیتی (گوسان) و در بخش زیرین شامل مخلوطی از اکسید و سولفید در مرز سازند سنگستان است [۱].
افق کانسنگ دره مرکزی: این بخش از کانسار دارای کانه‌زایی گسترده سرب، روی و نقره به صورت اکسیدی و سولفیدی است که با رسوب‌های آبرفت کواترنری پوشیده شده‌اند. کانه‌زایی در این بخش به صورت ناودیس بوده و در کنترل گسل‌های مربوط به دره مرکزی است [۱].

افق کانسنگ غربی تپه سیاه: رخنمون سطحی این بخش با دو بیرون‌زدگی از اکسیدهای آهن به همراه باریت دیده می‌شود که مقدار کمی سولفیدهای کانه‌دار نیز در آن وجود دارد [۱]. در رگه‌ها، باریت همراه با مس و اکسیدهای سرب وجود دارند [۵]. بالاترین بخش تپه‌های باریتی از ترکیب قطعه‌های برشی و قطعه‌های دولومیتی سازند تفت تشکیل شده است. در این بخش از کانسار، کانی‌زایی گسترده باریت دیده می‌شود. از دیگر کانی‌های همراه می‌توان به اسفالریت، گالن و مقدار کمی کالکوپیریت ± کالکوسیت اشاره کرد [۱]. حجم ماده معدنی در این بخش بالا، ولی عیار آن پایین است [۵].

روش انجام پژوهش

پس از بررسی‌های میدانی و تهیه بیش از ۵۰ نمونه از کانسنگ و سنگ میزبان بخش شرقی کانسار، تعداد ۱۸ مقطع نازک صیقلی و ۲۰ مقطع نازک تهیه شده و با میکروسکوپ قطبشی عبوری - بازتابی Kyowa در گروه زمین‌شناسی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) بررسی گردیدند. به منظور بررسی های کانی‌شناسی تکمیلی، تعداد ۶ نمونه به روش پراش پرتوی ایکس (XRD) در آزمایشگاه زرآزمای تهران بررسی شدند. تعداد ۲۵۲ نمونه به دست آمده از مغزه‌های حفاری در پهنه کانسنگ یال شرقی، به روش طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) در آزمایشگاه زرآزما تجزیه شدند که نتایج به دست آمده دربردارنده فراوانی ۳۳ عنصر در این نمونه‌هاست. عنصر Si به روش طیف سنجی فلئورسانس پرتوی ایکس (XRF) اندازه‌گیری شد. نتایج به دست آمده با نرم‌افزارهای اکسل و SPSS 26 تجزیه و تحلیل شدند. پارامترهای آماری تک متغیره و دو متغیره چون ماتریس همبستگی و وایازش دومتغیره میان عناصر محاسبه شدند. سرانجام عناصر وابسته به هم گروه‌بندی شده و تجزیه و تحلیل گردیدند. نقشه عنصری کانی دولومیت نیز با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در دانشگاه تربیت مدرس تهیه شد.



شکل۳ نقشه زمین‌شناسی بخش کانسنگ یال شرقی کانسار مهدی‌آباد که نشان‌دهنده موقعیت کان‌تن‌ها در مرز سازند تفت و سنگستان است [۹].

نتایج و بحث

کانه‌زایی

بر اساس بررسی مقاطع نازک، نازک صیقلی و صیقلی و همچنین تجزیه‌های زمین‌شیمیایی، کانی‌های اصلی اقتصادی در کانسنگ یال شرقی کانسار مهدی‌آباد شامل اسمیت‌زونیت ($ZnCO_3$)، سروزیت ($PbCO_3$)، هیدروزینسیت ($Zn_5(CO_3)_2(OH)_6$)، همی‌مورفیت ($Zn_4Si_2O_7(OH)_2.H_2O$) و کالکوفانیت ($(Zn,Fe,Mn)Mn_3O_7.3H_2O$) هستند. کانه‌های فرعی شامل: کالکوپیریت و پیریت هستند. کانی‌های دولومیت، کلسیت، هماتیت، گوتیت، لیمونیت، سیدریت و کوارتز و باریت به عنوان باطله حضور دارند.

بافت کانسنگ

بافت‌های رایج در پهنه کانسنگ یال شرقی رگه‌ای و رگچه‌ای، بافت برشی، بافت پرکننده فضای خالی، بافت جانشینی و بافت گل کلمی هستند. کانی‌های آنکریت و کالکوفانیت بیشتر دارای بافت رگچه‌ای هستند. گوتیت در بسیاری از نمونه‌ها بافت جانشینی دارد، در حالیکه در مقیاس میکروسکوپی می‌تواند دارای بافت گل کلمی نیز باشد. در شکل ۴ الف، اکسید و هیدروکسیدهای آهن چون هماتیت، گوتیت و لیمونیت جایگزین کانی‌های پیشین شده‌اند. در برخی نقاط به دلیل فراوانی بالاتر منگنز، مقدار کالکوفانیت بیشتر است و تقریبا به طور کامل جایگزین کانی‌های پیشین می‌شود (شکل ۴ ب). در این میان، بقایای کانی‌هایی چون گوتیت، کلسیت و آنکریت نیز دیده می شود. فضاهای خالی پرنشده نیز در چنین نمونه‌هایی فراوان هستند (شکل ۴ ب). رگچه‌های کلسیت تاخیری مجموعه کانی‌های نامبرده را قطع می‌کنند. در این نمونه‌ها، اغلب دو فاز کلسیت دیده می‌شود که یکی قدیمی‌تر بوده و دیگری جوان‌تر است. در شکل ۴ پ لیمونیت جانشین سیدریت‌های قدیمی‌تر شده است. آثاری از تجزیه سیدریت به هماتیت در راستای رخ‌های لوزی رخ در شکل ۴ پ دیده می‌شود. سپس، سیدریت به طور کامل به لیمونیت تبدیل شده است. کالکوفانیت، لیمونیت و هماتیت جوان‌تر از سیدریت هستند. دو نسل آنکریت در نمونه‌ها دیده می‌شود (شکل ۴ ت). نسل قدیمی‌تر آنکریت با رگچه‌های باریت و گوتیت قطع شده، در حالیکه نسل جدیدتر در مرز میان رگچه‌های کلسیتی و گوتیت تشکیل شده است. آنکریت زمانی تشکیل می‌شود که Fe^{2+} جایگزین نیمی از Mg^{2+} در شبکه بلوری دولومیت شود [۱۲،۱۳].

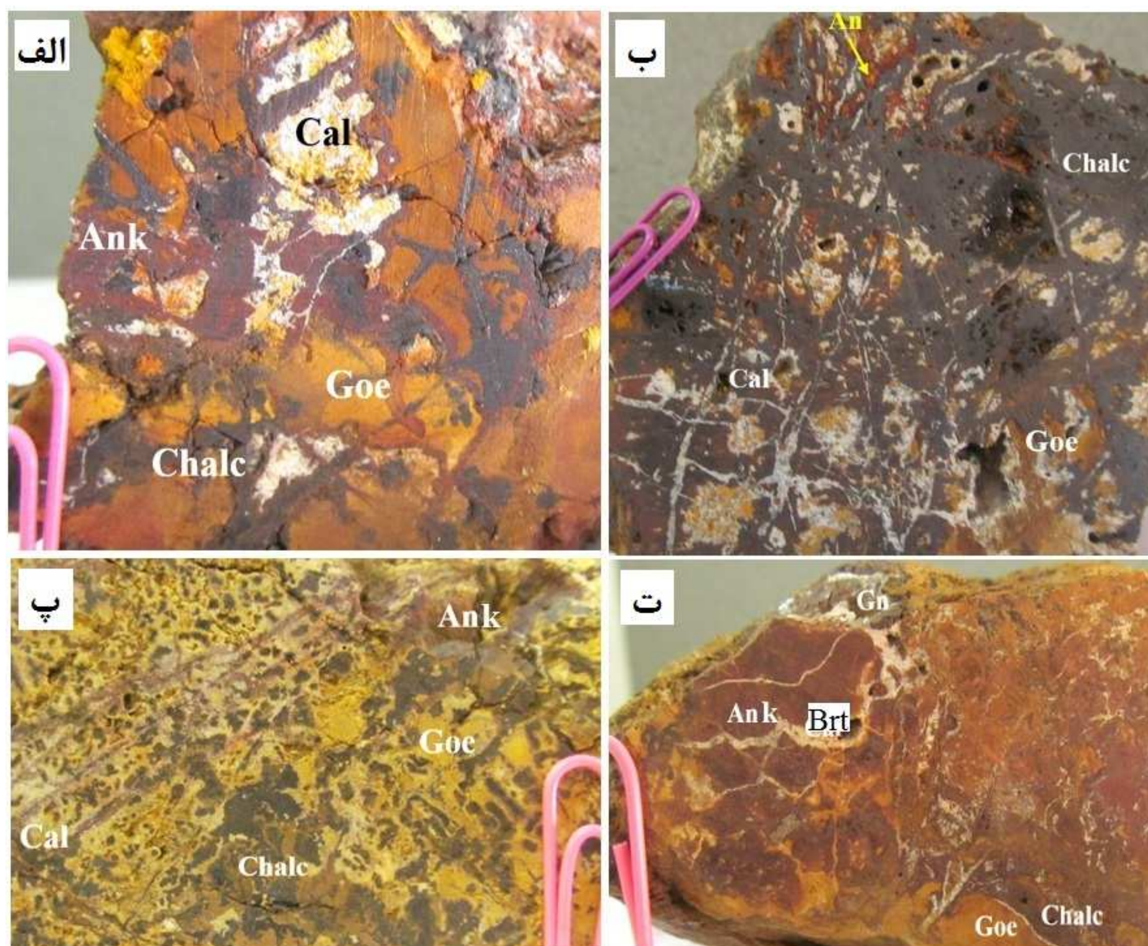
در نمونه‌های میکروسکوپی، باریت‌های بخش شرقی کانسار مهدی‌آباد به صورت رگه‌ای و پر کننده فضای خالی (شکل ۵ الف) حضور دارند. بلورهای باریت به صورت خودشکل تا نیمه‌شکل‌دار و درشت‌بلور دیده می‌شوند. در شکل ۵ ب، تیغه‌های باریت با ماکل کارلسباد با بافت رگه‌ای و پرکننده فضاهای خالی همراه با دولومیت حضور دارند.

چند نسل دولومیت در مقاطع میکروسکوپی تهیه شده از سنگ میزبان قابل تشخیص است. در شکل‌های ۵ پ و ت،

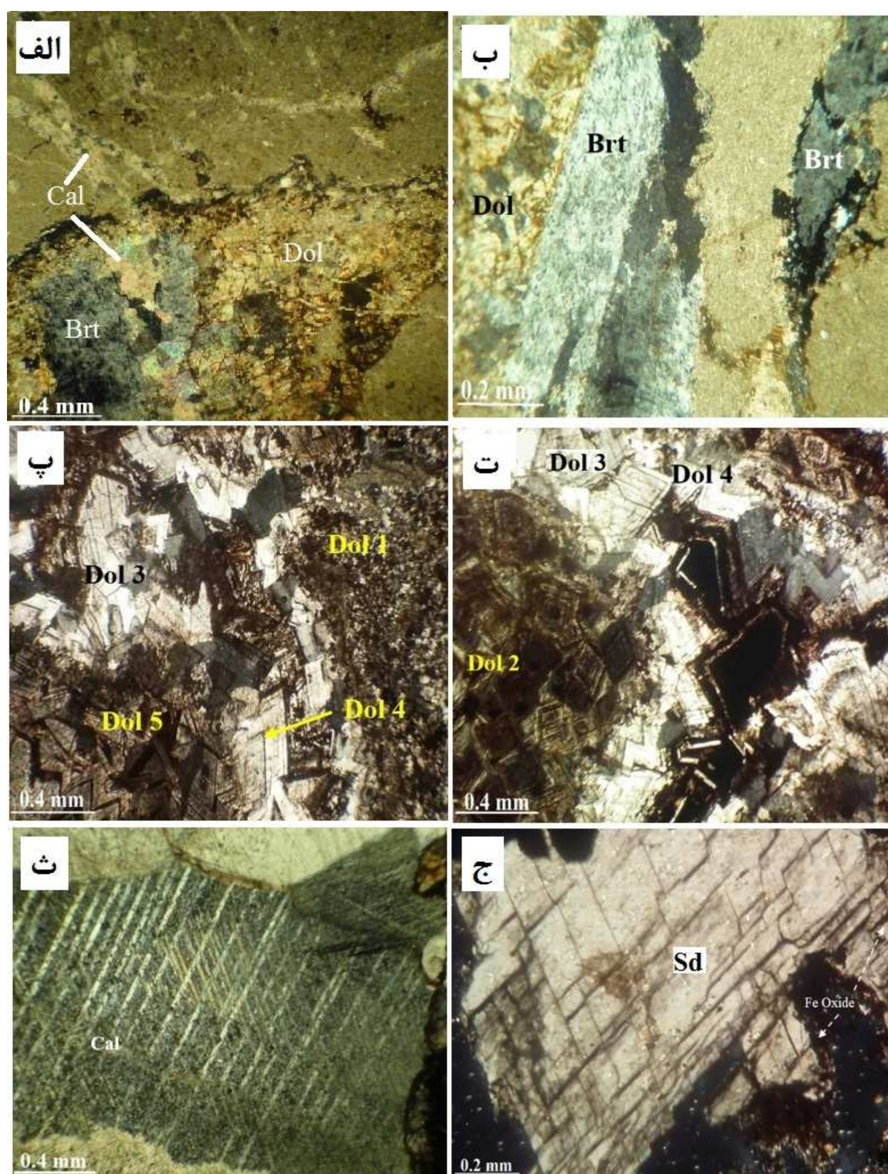
[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.1.8.2]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.1.103]

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.1.8.2]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.1.103]

دست کم ۴ نسل دولومیت دیده می‌شود که در مراحل مختلف توسط سیال‌های دگرسان کننده نهشته شده‌اند. دولومیت اغلب کانی ثانویه است که جانشین کانی‌های کربناتی پیشین می‌شود. برخلاف کلسیت، دولومیت اغلب به صورت بلورهای خوش‌وجه لوزی‌شکل تشکیل می‌شود. این دولومیت‌ها در اندازه‌ها و رنگ‌های مختلفی حضور دارند، ولی ویژگی مشترک همه آن‌ها، خودشکل بودن بلورها و منطقه‌بندی آنهاست. دولومیت نسل اول ریزبلور است و به نظر می‌رسد که طی مراحل اولیه درونزایی تشکیل شده باشد. اندازه این بلورها نشان‌دهنده جایگاه کشندی در هنگام تشکیل آن‌هاست [۱۴،۵]. دولومیت‌های نسل دوم دارای منطقه‌بندی هستند و به شکل لوزی‌مانند و به رنگ قهوه‌ای دیده می‌شوند (شکل ۵ ت). دولومیت‌های زین اسبی (نسل ۳) نشانگر دگرسانی گرمابی هستند (شکل ۵ پ). دولومیت‌های زین اسبی، باطله‌های متداولی هستند که پس از درونزایی و بر اثر فرایندهای گرمابی در کانسارهای سرب و روی نوع دره می سی سی پی (MVT) تشکیل می‌شوند [۱۵]. جوان‌ترین نسل از دولومیت‌ها (نسل ۴) دارای نوارهایی از کانی‌های کدر (اکسید آهن) به رنگ سیاه است، که می‌تواند نشانگر نهشته شدن از محلول گرمابی کانه‌زا باشد (شکل ۵ پ).



شکل ۴ نمونه دستی کانسنگ پهنه شرقی: الف) مجموعه‌ای از اکسید و هیدروکسیدهای آهن (هماتیت، گوتیت و لیمونیت) که جانشین کانی‌های کربناتی (کلسیت) شده‌اند، همچنین ساخت و بافت رگچه‌ای در کالکوفانیت و هماتیت دیده می‌شود. ب) کالکوفانیت تقریبا به طور کامل سنگ را در برگرفته است. بقایای کلسیت و گوتیت دیده می‌شود. رگه‌های کلسیت تاخیری این مجموعه را قطع می‌کند. پ) تجزیه سیدریت به هماتیت در راستای سطوح رخ (سمت راست) و جانشینی نهایی آن توسط لیمونیت. ت) شکستگی‌های آنکریت اولیه توسط رگه باریت همراه با کمی گالن پر شده است. آنکریت ثانویه در مرز میان رگچه کلسیتی و گوتیت تشکیل شده است (پایین)؛ (Gth : گوتیت، Chal : کالکوفانیت، Ank : آنکریت، Lm : لیمونیت، Cal : کلسیت، Gn : گالن و Hem : هماتیت [۱۲]).



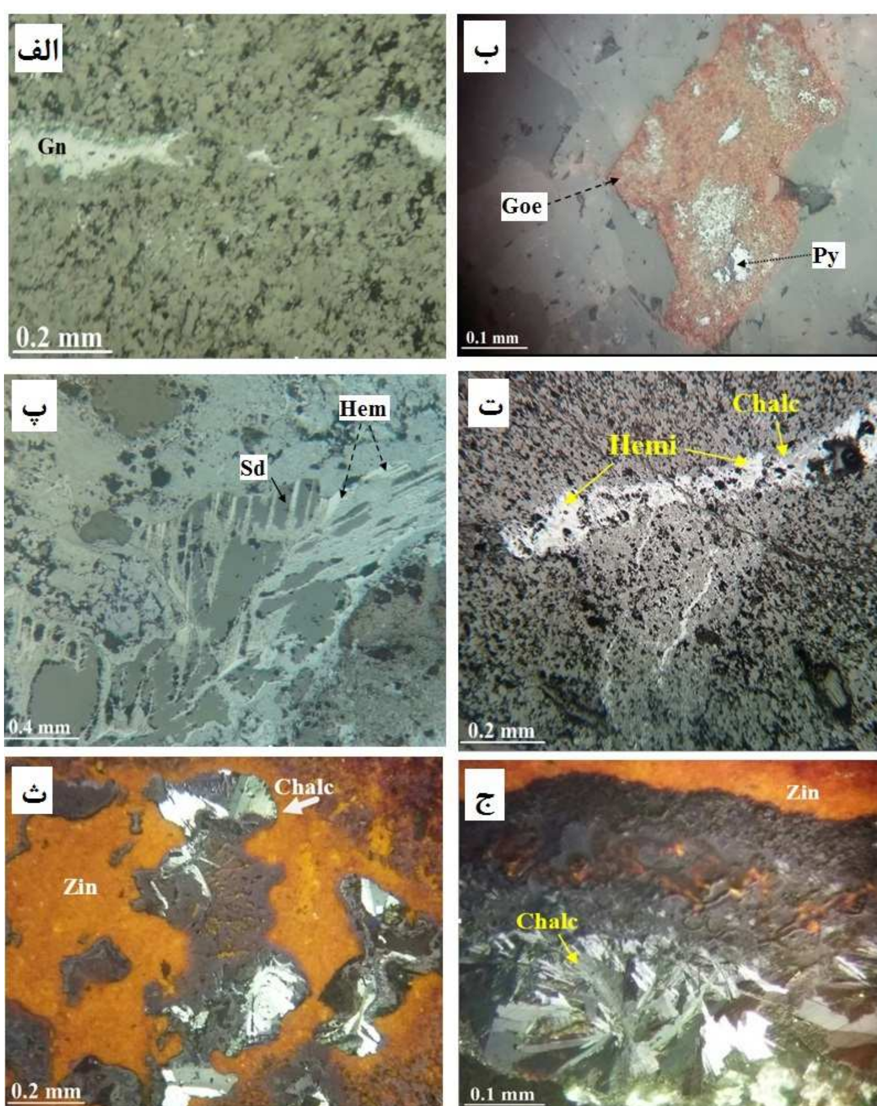
شکل ۵ الف) باریت با بافت دانه‌ای نیمه شکل‌دار تا کشیده در پهنه کانسنگ یال شرقی (نور عبوری قطبیده متقاطع، XPL). ب) باریت تیغه‌ای درشت بلور با ماکل کارلسباد در کنار دولومیت (نور عبوری،XPL). پ) و ت) نسل‌های مختلف کانی دولومیت در سنگ میزبان (نور عبوری،XPL). ث) کلسیت درشت بلور در کانسنگ (نور عبوری،XPL). ج) سیدریت که در راستای رخ‌های لوزی رخ خود به اکسیدهای آهن تجزیه شده است (نور عبوری قطبیده صفحه‌ای، PPL). (Brt : باریت، Dol : دولومیت، Cal : کلسیت، Sd : سیدریت و Fe Oxide : اکسیدهای آهن [۱۲]).

به دلیل وجود سنگ میزبان کربناتی در کانسار مهدی‌آباد، کانی کلسیت از مهم‌ترین کانی‌های باطله در منطقه مورد بررسی است (شکل ۵ ث). رگه‌ها و رگچه‌های کلسیت تاخیری نیز در نقاط مختلف کانسار دیده می‌شوند. کانی سیدریت اغلب از جایگزینی Fe^{2+} موجود در محلول‌های آهن‌دار به جای کلسیم در آهک‌ها تشکیل می‌شود [۱۶] (شکل ۵ ج). این کانی نیز مانند آنکریت در شرایط احیایی تشکیل می‌شود. آهن سه ظرفیتی (Fe^{3+}) نمی‌تواند در ساختار این کانی‌ها جای بگیرد، از این رو در شرایط اکسایشی، کانی‌های گوتیت یا هماتیت در راستای سطوح رخ این کانی‌ها تشکیل می‌شود [۱۷]. این امر در دمای زیر ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد [۱۸]. فراوانی آهن و منگنز در کربنات‌ها به پتانسیل اکسایش-کاهش (Eh) حساس است. مقادیر بالای این عناصر در شرایط احیایی وارد کربنات‌ها شده و کانی‌های سیدریت و آنکریت را تشکیل می‌دهد [۱۶]. این کانی‌ها می‌توانند در شرایط درونزایی یا در دمای بالاتر توسط سیال‌های گرمابی تشکیل شوند. حضور

دولومیت‌های آهن‌دار و آنکریت نشاندهنده اثر محلول گرمابی غنی از آهن بر دولومیت است.

در پهنه کانسنگ یال شرقی کانسار مهدی‌آباد، به ویژه در بخش‌های سطحی، کانی‌های سولفیدی فراوانی کمی دارند. کانه گالن به مقدار بسیار کم وجود دارد. بخش عمده این کانی در اثر اکسایش به سروزیت تبدیل شده است. در شکل ۶ الف، گالن به صورت رگچه‌ای دیده می‌شود. پیریت نیز به مقدار کمی وجود دارد که بیشتر به گوتیت تجزیه شده است (شکل ۶ ب). کانی گوتیت فراوان در مقاطع میکروسکوپی تهیه شده از پهنه شرقی دیده می‌شود. این کانی بیشتر بافت جانشینی دارد و جایگزین سیدریت، هماتیت و پیریت شده است. بافت‌های گل کلمی، رگه‌ای و پرشدگی فضای خالی نیز در این کانی دیده می‌شود. سیدریت در راستای رخ‌ها به هماتیت (شکل ۶ پ) و گوتیت تبدیل شده است.

کانی‌های اکسیدی و کربناتی روی مانند کالکوفانیت، همی‌مورفیت و هیدروزینسیت در مقاطع پهنه کانسنگ یال شرقی فراوان هستند (شکل‌های ۶ ت، ث، ج). کالکوفانیت بیشتر دارای بافت رگه‌ای و تیغه‌ای است.



شکل ۶ الف) گالن به صورت رگه‌ای در زمینه‌ای از کربنات‌ها (نور بازتابی، PPL). ب) جانشینی کانه پیریت توسط گوتیت؛ (نور بازتابی، PPL). پ) هماتیت در راستای رخ‌ها جانشین کانی سیدریت شده است (نور بازتابی، PPL). ت) گسترش کانی‌های کالکوفانیت (خاکستری تیره و شعاعی) و همی‌مورفیت (خاکستری روشن) در زمینه‌ای از هیدروزینسیت (نور بازتابی، PPL). ث) گسترش کانی کالکوفانیت با بافت تیغه‌ای و پر کننده فضای خالی در زمینه‌ای از کانی هیدروزینسیت (نور بازتابی، XPL). ج) کالکوفنیت با بافت تیغه‌ای به همراه هیدروزینسیت؛ (نور بازتابی، XPL). (Gn : گالن، Py : پیریت، Gth : گوتیت، Hem : هماتیت، Sd : سیدریت، Chal : کالکوفانیت، Hemi : همی‌مورفیت، Zen : هیدروزینسیت[۱۲]).

توالی همبرزایی

بر اساس بازدیدهای صحرایی، بررسی نمونه‌های دستی و مقاطع میکروسکوپی، روابط ساختی و بافتی کانه‌ها و باطله‌ها، توالی همبرزایی در پهنه شرقی کانسار روی – سرب – باریت مهدی‌آباد یزد شامل سه مرحله (شکل ۷) که در ادامه توضیح داده می‌شود.

مرحله پیش از کانه‌زایی: در این مرحله، نخست درونزایی صورت گرفته و سنگ میزبان اصلی شکل گرفته است. پس از شکل‌گیری سنگ میزبان و در مراحل پایانی بر اثر فعالیت محلول‌های دگرسان‌کننده، کانی‌های دولومیت، آنکریت، سیدریت، کوارتز و باریت تشکیل شده‌اند.

مرحله کانه‌زایی: این مرحله که شامل دو بخش است که در مرحله نخست، با نفوذ محلول‌های گرمابی سولفیدهای نسل اول در دیواره حفره ها، درزه‌ها و فضای خالی برش‌ها نهشته شده‌اند [۱۱]. در این مرحله، کانه‌های سولفیدی اولیه چون اسفالریت، گالن و پیریت تشکیل شده‌اند. در مرحله دوم، محلول‌های گرمابی سولفیدها را با بافت توده‌ای و انتشاری در فضای برشی مناطق گسلی نهشته کرده‌اند [۱۱].

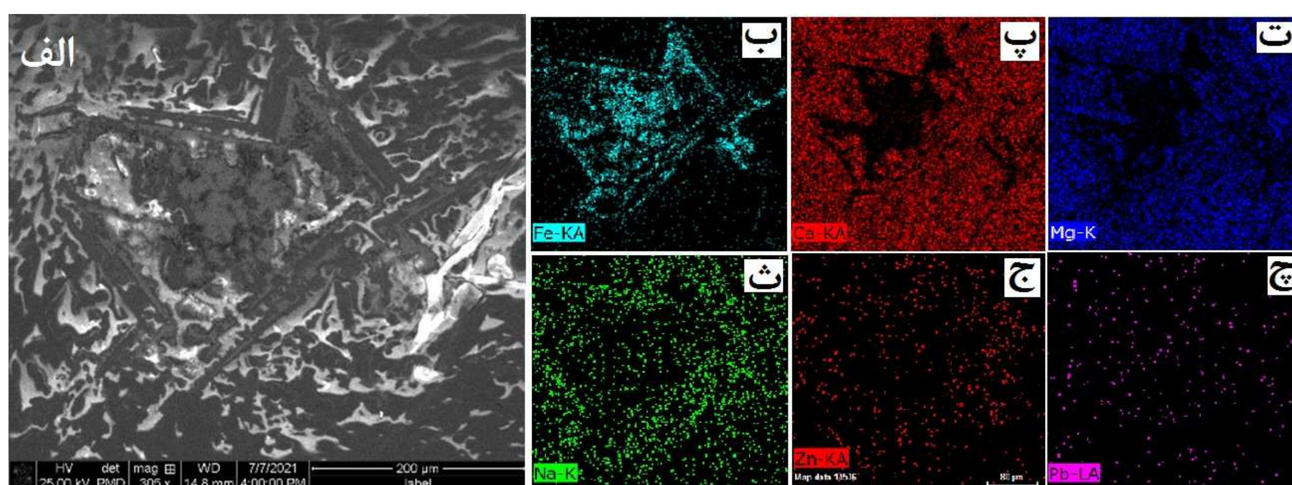
مرحله اکسایش (تشکیل پهنه برونزاد): در این مرحله، سولفیدهای سرب و روی در اثر اکسایش و هوازدگی به کانی‌های غیر سولفیدی تبدیل شده‌اند. این مرحله با تشکیل کانه‌های غیر سولفیدی همی‌مورفیت، هیدروزینسیت، کانه اکسیدی روی- منگنز (کالکوفانیت) و اکسید و هیدروکسیدهای آهن (هماتیت، گوتیت و لیمونیت) همراه است.

نقشه عنصری دولومیت

به منظور مقایسه شیمی نسل‌های مختلف دولومیت در سنگ میزبان، نقشه عنصری این کانی تهیه گردید (شکل ۸). به این ترتیب، دولومیت نسل پنجم دارای مقدار آهن بیش‌تر و کلسیم و منیزیم کمتری نسبت به سایر نسل‌های این کانی است. مقدار روی و سرب نیز در این نسل از دولومیت کمتر از سایر نسل‌هاست. بر این اساس، به نظر می‌رسد که این نسل از دولومیت‌ها پس از کانه‌زایی تشکیل شده است. سیال گرمابی تشکیل‌دهنده این دولومیت‌ها دارای آهن بیشتر و سرب و روی کمتر بوده است. به بیان دیگر، این نسل از دولومیت پس از کانه‌زایی تشکیل شده است، در حالی که نسل های پیشین دولومیت که پیرامون دولومیت نسل پنجم حضور دارند، سرب و روی بیشتر و آهن کمتری دارند.

Minerals	Pre – Mineralization	Mineralization (Early → Late)	Post – Mineralization (Supergene)
Calcite	———		
Dolomite	———		
Ankerite	———		
Barite	———		———
Quartz	———		
Siderite	———		
Galena		———	······
Pyrite		———	······
Sphalerite		———	
Hemimorphite			———
Hydrozincite			———
Chalcophanite			———
Geothite			———
Hematite			———
Limonite			———

شکل ۷ توالی همبرزایی کانه‌ها و کانی‌ها در افق کانسنگ یال شرقی کانسار مهدی‌آباد.



شکل ۸ الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) و نقشه عنصری آهن (ب)، کلسیم (پ)، منیزیم (ت)، سدیم (ث)، روی (ج) و سرب (چ) در کانی دولومیت.

زمین شیمی

نمونه‌های برداشت شده از مغزه‌های حفاری پهنه کانسنگ یال شرقی (۸ گمانه، جدول ۱) به روش طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی تجزیه شدند. در جدول ۲ نتایج تجزیه یازده نمونه انتخابی از پهنه کانسنگ یال شرقی آورده شده است. به منظور درک بهتر شرایط کانه‌زایی در کانسنگ یال شرقی کانسار، نخست برای سهولت بررسی، پارامترهای آماری مربوط به هر عنصر شامل مقادیر میانگین، خطای استاندارد، کمینه، بیشینه، و انحراف معیار بر پایه روابط ریاضی محاسبه شدند نتایج در جدول ۳ ارائه شده است. در ادامه برای بررسی رفتار عناصر در این توالی، ضرایب همبستگی عناصر محاسبه شد.

ضرایب همبستگی پیرسون

جدول ۴ ضرایب همبستگی بین عناصر در بخش کانسنگ یال شرقی کانسار مهدی‌آباد را نشان می‌دهد. در این منطقه، روی دارای ضریب همبستگی مثبت با عناصر کادمیم، سرب، آلومینیم، باریم، کبالت، مس، آهن، منگنز، نقره و گوگرد است. از این میان، روی بیشترین همبستگی را با عنصر کادمیوم (۰/۸۲۰) نشان می‌دهد که به دلیل شباهت ویژگی‌های زمین شیمیایی این دو عنصر است (شکل ۹ ب). کادمیوم در ساختار اسفالریت جانشین عنصر روی می‌شود [۱۹]. همبستگی مثبت میان عناصر روی و سرب در کانسنگ یال شرقی کانسار ضعیف (۰/۳۱۶، شکل ۹ الف) است. دلیل این امر را می‌توان تحرک و انحلال‌پذیری بیشتر روی نسبت به سرب در این بخش دانست. می‌توان گفت که عنصر روی به دلیل انحلال‌پذیری بالاتر [۲۰]، بیش از سرب دستخوش اکسایش و هوازدگی شده است. این تفاوت، باعث کاهش همبستگی میان دو عنصر شده است. همبستگی این دو عنصر در بخش‌های دیگر کانسار بیش از ۰/۹ است.

جدول ۱ ویژگی‌ها و مختصات جهانی مرکاتور معکوس UTM گمانه‌های مورد بررسی در پهنه کانسنگ یال شرقی.

عمق	ارتفاع دهانه	N	E	شماره گمانه
۱۰۰/۹	۱۸۷۰/۱۳۵	۳۴۸۴۰۲۵/۲	۳۱۰۶۵۱/۴۴	۹۶۱۶
۸۲/۳۵	۱۸۰۳/۰۰۴	۳۴۸۳۸۳۱/۹	۳۱۰۵۷۲/۰۷	۹۶۱۷
۱۱۲/۲	۱۸۶۵/۶۷۸	۳۴۸۴۱۲۲/۹	۳۱۰۶۷۵/۸۶	۹۶۱۸
۱۴۰/۸	۱۸۵۶/۶۲۳	۳۴۸۴۳۷۲	۳۱۰۶۹۷/۰۲	۹۶۱۹
۱۴۳/۳۵	۱۸۵۹/۸۷۵	۳۴۸۴۲۷۳/۳	۳۱۰۶۷۶/۹۱	۹۶۲۰
۶۳/۲	۱۸۴۸/۱۸۶	۳۴۸۴۳۶۶/۱	۳۱۰۷۶۱/۱	۹۶۲۱
۱۲۴/۴۵	۱۸۶۲/۱۳۴	۳۴۸۴۱۷۴/۶	۳۱۰۶۷۱/۷۸	۹۶۲۲
۹۷/۶	۱۸۷۳/۶۹	۳۴۸۳۹۵۰/۸	۳۱۰۶۴۳/۱	۹۶۲۳

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.1.8.2]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.1.103]

جدول ۲ نتایج تجزیه زمین شیمیایی ۱۱ نمونه انتخابی از ۲۵۲ نمونه پهنه کانسنگ یال شرقی مهدی‌آباد (عناصر فرعی برحسب ppm).

نمونه	M2193	M2195	M2196	M2197	M2198	M2199	M2200	M2201	M2202	M2203	M2204
Si (%)	۳٫۷۷	۴٫۱	۴٫۶۹	۰٫۸۱	۲٫۲۹	۲٫۲۹	۳٫۹	۷٫۸۷	۳٫۹۵	۲٫۴۵	۵٫۰۳
Al (%)	۰٫۲۵	۰٫۲۷	۰٫۱۷	۰٫۱۹	۰٫۵۴	۰٫۶	۱٫۱۳	۲٫۳۶	۱٫۰۹	۰٫۵۹	۱
As	۵۰٫۲	۲۸٫۵	۱۶٫۷	۱۲۸٫۶	۱۶۱٫۲	۱۱۶٫۲	۴۴۹	۵۱۲٫۲	۲۷۶٫۲	۶۰۰٫۵	۴۶۰٫۳
Ba (%)	۳٫۷۹	۰٫۴۹	۰٫۴۵	۲۱٫۴۴	۷٫۵۹	۲٫۸۸	۳٫۰۸	۱٫۴۷	۱٫۱۱	۴٫۲۸	۱٫۶۵
Ca (%)	۲٫۰۳	۳٫۳۹	۲٫۲۹	۲٫۴۳	۰٫۶۶	۱٫۰۸	۱٫۹۹	۰٫۳۲	۰٫۷	۰٫۵	۰٫۵۹
Cd	۲۳٫۷	۵۹٫۸	۱۰٫۸	۳۴٫۶	۴۳٫۶	۹۳٫۹	۱۱۳	۲۶٫۷	۴۴٫۶	۱۰۰٫۲	۹۹٫۱
Co	۱۱	۱۰	۱۱	۱۱	۱۱	۱۲	۱۴	۱۵	۱۳	۱۱	۱۴
Cu	۲۳۷	۸۹	۴۵	۹۸۶	۲۶۶	۲۰۶	۳۰۸	۲۴۴	۱۲۶	۲۳۴	۷۹
Fe (%)	۳۹٫۳	۳۷٫۹۷	۴۲٫۰۱	۲۹٫۶۲	۳۱٫۶۹	۳۲٫۴۸	۳۰٫۳۵	۳۰٫۸۳	۳۶٫۸۷	۳۶٫۴۶	۲۸٫۴۷
K (%)	۰٫۱۱	۰٫۱۲	۰٫۰۶	۰٫۰۶	۰٫۲۵	۰٫۲۸	۰٫۵۸	۱٫۲۹	۰٫۴۴	۰٫۲۸	۰٫۵
Mg (%)	۱٫۲۴	۱٫۷۷	۱٫۶۷	۱٫۱۷	۰٫۳۳	۰٫۴۶	۰٫۸۴	۰٫۲۵	۰٫۴۲	۰٫۲۳	۰٫۳۱
Mn (%)	۸٫۹۱	۷٫۵۷	۷٫۶۸	۶٫۵۸	۱۵٫۳۳	۱۶٫۵۲	۱۶٫۸۵	۱۶٫۹	۱۷٫۹۳	۱۶٫۳۹	۱۵٫۳۶
Mo	۰٫۹۷	۰٫۶۷	۰٫۸۲	۰٫۵	۰٫۷۳	۰٫۸۴	۱٫۰۲	۱٫۰۵	۰٫۸۵	۰٫۸۲	۰٫۸۱
Na	۶۵۳	۵۲۷	۶۲۸	۳۷۷	۷۹۹	۵۴۶	۷۰۶	۹۳۹	۹۵۰	۷۵۵	۷۹۹
Ni	۱۰	۸	۷	۶	۱۲	۱۵	۱۶	۱۶	۲۰	۲۵	۲۳
P	۶۶	۴۳	۳۳	۳۳	۵۱	۵۲	۹۰	۱۷۸	۱۴۰	۹۲	۱۱۸
Pb (%)	۰٫۱۳	۰٫۶۵	۰٫۲	۰٫۴۱	۰٫۹	۱٫۳۲	۰٫۳	۰٫۱۷	۰٫۱۵	۰٫۴۴	۰٫۴۲
S	۰٫۵۹	۰٫۰۸	۰٫۰۵	۴٫۴۹	۱٫۱۷	۰٫۴۹	۰٫۵	۰٫۲۲	۰٫۱۱	۰٫۵۹	۰٫۲۸
Ti	۱۳۹	۱۴۵	۱۰۴	۹۸	۲۲۹	۲۷۵	۴۹۴	۱۲۶۷	۴۹۸	۲۸۸	۴۵۴
Zn (%)	۲٫۲۶	۴٫۰۲	۱٫۵۵	۲٫۲۷	۵٫۲	۸٫۲	۴٫۴۶	۳٫۱۴	۲٫۵۶	۴٫۵۹	۱۱٫۲۵
Ag	۹٫۷	۱۲٫۹	۱۰٫۴	۱۵٫۱	۴۵٫۷	۳۵٫۳	۳۲٫۷	۲۲٫۸	۱۵٫۷	۳۰٫۲	۲۵٫۳
Be	۱٫۶	<۱	<۱	<۱	۴٫۱	۵٫۸	۸٫۲	۷٫۲	۶٫۵	۷٫۹	۹٫۱
Ce	۳	۶	۵	۱۰	۵	۶	۹	۱۹	۱۱	۷	۱۰
Cr	۲۴	۲۳	۲۱	۱۸	۳۳	۳۳	۴۱	۶۵	۶۸	۳۶	۴۱
La	۵	۶	۵	۸	۵	۵	۸	۱۴	۹	۷	۹
Li	۳	۳	۳	۱	۲	۲	۳	۴	۳	۲	۲
Sb	<۰٫۵	۳۶٫۳	۳۲٫۶	<۰٫۵	<۰٫۵	<۰٫۵	<۰٫۵	<۰٫۵	۶۵	۸۷٫۹	۳۷٫۵
Sc	۰٫۵	۰٫۵	<۰٫۵	۰٫۵	۱٫۲	۱٫۳	۲٫۱	۳٫۷	۱٫۹	۱٫۹	۲٫۳
Sr	۳۹۹	۱۰۷	۱۵۵	۱۹۷۵	۸۷۸	۳۲۸	۴۲۸	۲۴۳	۲۷۵	۶۱۱	۳۱۶
Th	۱۵۰٫۴	۶۰٫۸	۵۶٫۱	۵۲٫۸	۱۸۵٫۲	۱۰۹٫۸	۱۱۶٫۴	۱۷۱٫۳	۱۳۶٫۹	۱۸۳٫۲	۱۶۹٫۹
U	۳۵٫۲	۳۷٫۶	۴۱٫۲	۲۹	۲۸	۲۷٫۶	۳۱٫۳	۲۷٫۱	۲۹٫۶	۲۷	۲۵٫۸
V	۷	۶	۵	۸	۱۱	۱۴	۲۴	۵۳	۳۷	۲۸	۳۰
Y	۳	۲	۲	۲	۵	۵	۵	۸	۷	۷	۱۱
Yb	۲	۱٫۹	۲٫۱	۱٫۶	۱٫۸	۱٫۸	۱٫۹	۲٫۲	۲٫۳	۲٫۲	۱٫۹
Zr	۱۴	۱۴	۱۳	۱۱	۱۵	۱۶	۲۳	۴۲	۲۳	۱۷	۲۰
(%)مواد فرار	۱۳٫۸۴	۱۶	۱۵٫۱۱	۱۰٫۰۴	۱۱٫۷۸	۱۲٫۱۲	۱۳٫۶۳	۱۰٫۴۶	۱۲٫۲۵	۱۱٫۷۲	۱۱٫۵

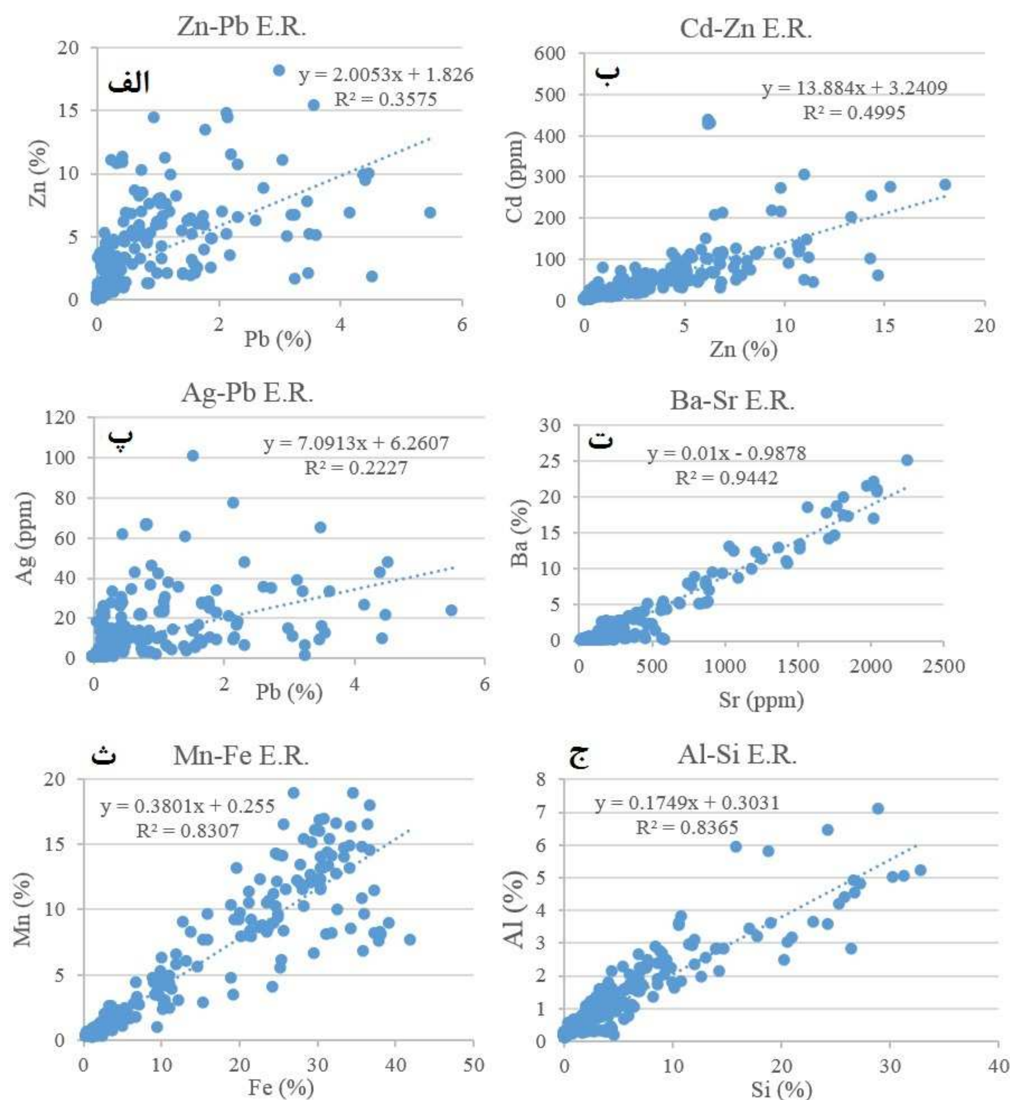
جدول ۳ پارامترهای آماری داده‌های زمین شیمیایی مربوط به نمونه‌های کانسنگ یال شرقی کانسار مهدی‌آباد (غلظت عناصر کمیاب بر حسب ppm بیان شده است).

عنصر	متوسط	خطای استاندارد	کمینه	بیشینه	انحراف معیار
Si (%)	۵٫۵۲	۰٫۴۲	۰٫۰۶	۳۲٫۸۴	۶٫۸۹۶
Al (%)	۱٫۲۵	۰٫۰۸	۰٫۰۶۵۵	۷٫۰۸۲۴	۱٫۲۸۱
As	۱۵۱٫۸۲	۱۹٫۲۱	۲	۲۶۵۱٫۴	۳۱۶٫۲۴۲
Ba (%)	۲٫۴۷	۰٫۳۱	۰٫۰۰۲۵	۲۵٫۰۶۹۴	۵٫۰۸۴
Ca (%)	۱۳٫۰۴	۰٫۷۲	۰٫۰۶۴۳	۳۶٫۸۷۱۱	۱۱٫۴۴
Cd	۵۷٫۸۹	۵٫۸۴	۰٫۲۵	۵۶۸٫۳	۷۴٫۵۹
Cu (%)	۰٫۰۲	۰	۰٫۰۰۰۱	۰٫۳۲۲۶	۰٫۰۴
Fe (%)	۱۳٫۵۱	۰٫۷۹	۰٫۳۷۰۷	۴۲٫۰۰۸۸	۱۲٫۵۲۲
K (%)	۰٫۵۳	۰٫۰۴	۰٫۰۱	۲٫۹۰۵۵	۰٫۵۷۵
Mg (%)	۳٫۸۳	۰٫۲۶	۰٫۰۴۸۳	۱۳٫۵۰۹	۴٫۰۹۵
Mn (%)	۵٫۳۹	۰٫۳۳	۰٫۱۴۷۱	۱۸٫۹۱۲۶	۵٫۲۵۷
Mo	۱٫۱۱	۰٫۰۸	۰٫۵	۱۲	۱٫۲۲۴
Na	۸۱۸٫۹۸	۸۸٫۰۲	۳۳۷	۱۴۵۳۷	۱۴۶۴٫۵۴۲
Ni	۱۲٫۶۵	۰٫۵۵	۱	۴۷	۸٫۶۵۳
P	۱۲۱٫۶۹	۵٫۷۱	۲۹	۵۳۱	۹۴٫۰۰۶
Pb (%)	۰٫۷۴	۰٫۰۷	۰٫۰۰۲۳	۵٫۵۱	۱٫۰۶۸
S (%)	۰٫۵۹	۰٫۰۷	۰٫۰۰۵۵	۵٫۲۷۲	۱٫۰۹۱
Ti	۶۲۰٫۱	۴۲٫۴۳	۴۴	۳۸۲۵	۶۸۰٫۸۳۱
Zn (%)	۳٫۹۱	۰٫۳۴	۰٫۰۲۴۸	۱۸٫۰۷	۳٫۵۶۶
Ag	۱۱٫۸۲	۱٫۰۶	۰٫۲۴	۱۱۶٫۱	۱۶٫۷۱۹
Be	۲٫۹۵	۰٫۱۷	۱	۹٫۱	۲٫۰۲۶
Ce	۱۵٫۱۴	۰٫۷۱	۲	۶۴	۱۱٫۵۱۳
Cr	۳۰٫۶۸	۱٫۲۳	۶	۱۲۸	۲۰٫۱۴۹
La	۹٫۵۳	۰٫۳۵	۳	۳۳	۵٫۶۹۵
Li	۳٫۵۳	۰٫۱۹	۱	۱۷	۳٫۰۳۷
Sb	۲۶٫۰۴	۱٫۷۸	۰٫۸۲	۹۹	۲۴٫۸۴۷
Sc	۲٫۳۸	۰٫۱۴	۰٫۵	۱۱٫۶	۲٫۰۹۵
Sr	۳۰۰	۳۰	۱۶	۲۲۶۱	۴۹۰
Th	۴۸٫۵۱	۳٫۵۱	۳٫۸	۳۲۲٫۴	۵۳٫۹۴۷
U	۱۹٫۵۵	۰٫۶۹	۵٫۱	۴۶٫۳	۱۰٫۲۶
V	۳۳٫۵۶	۱٫۴۱	۵	۱۶۶	۲۲٫۵۳۲
Y	۶٫۴۶	۰٫۲۵	۱	۲۱	۴٫۱۴
Yb	۱٫۳۴	۰٫۰۴	۰٫۴	۲٫۹	۰٫۵۹۳
Zr	۲۳٫۹۳	۱٫۲۴	۵	۱۰۸	۱۸٫۶۷۹
LOI (%)	۲۶٫۵۴	۰٫۸۶	۶٫۱۷	۴۶٫۷۲	۱۳٫۷۳۵

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.1.8.2]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.1.103]

جدول ۴ ضرایب همبستگی بین عناصر منتخب در کانسنگ یال شرقی کانسار مهدی‌آباد.

	Si	Al	Ba	Ca	Cd	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Pb	S	Zn	Ag	Sr
Si	۱															
Al	۰٫۹۲	۱														
Ba	-۰٫۱۴	-۰٫۱۶	۱													
Ca	-۰٫۳۶	-۰٫۲۸	-۰٫۴۴	۱												
Cd	۰٫۰۲	۰٫۰۹	۰٫۰۷	-۰٫۳۵	۱											
Cu	-۰٫۰۸	-۰٫۰۸	۰٫۷۲	-۰٫۳۶	۰٫۱	۱										
Fe	-۰٫۰۹	-۰٫۱۵	۰٫۴۶	-۰٫۷۸	۰٫۱۷	۰٫۳۵	۱									
K	۰٫۸۷	۰٫۹۴	-۰٫۱۵	-۰٫۲۶	۰٫۰۱	-۰٫۰۳	-۰٫۱۴	۱								
Mg	-۰٫۳۴	-۰٫۳۶	-۰٫۳۵	۰٫۴۱	-۰٫۲۳	-۰٫۲۷	-۰٫۴۷	-۰٫۳۲	۱							
Mn	-۰٫۱	-۰٫۱۶	۰٫۳۹	-۰٫۷۳	۰٫۱۴	۰٫۲۵	۰٫۹۱	-۰٫۱۶	-۰٫۴۹	۱						
P	۰٫۷۶	۰٫۷۲	-۰٫۲۲	-۰٫۲	-۰٫۰۷	-۰٫۰۷	-۰٫۲۵	۰٫۷۵	۰٫۰۳	-۰٫۲۷	۱					
Pb	۰٫۰۶	۰٫۱	۰٫۴۳	-۰٫۴	۰٫۳۴	۰٫۴	۰٫۲۴	۰٫۱۷	-۰٫۲۹	۰٫۱۸	۰٫۱۱	۱				
S	۰٫۱	۰٫۱۴	۰٫۶۳	-۰٫۳۷	۰٫۱	۰٫۵۹	۰٫۲۲	۰٫۳۳	-۰٫۲۶	۰٫۱۱	۰٫۲۴	۰٫۶۳	۱			
Zn	-۰٫۰۱	۰٫۰۴	۰٫۰۶	-۰٫۴۳	۰٫۸۲	۰٫۰۸	۰٫۲۵	-۰٫۰۵	-۰٫۲۸	۰٫۲۳	-۰٫۱	۰٫۳۲	۰٫۰۶	۱		
Ag	۰٫۰۴	۰٫۰۶	۰٫۵۱	-۰٫۵۷	۰٫۱۷	۰٫۴۶	۰٫۵۴	۰٫۱۶	-۰٫۴۱	۰٫۵۶	۰٫۰۷	۰٫۵۲	۰٫۶۱	۰٫۱۷	۱	
Sr	-۰٫۱۱	-۰٫۱۴	۰٫۹۷	-۰٫۴۵	۰٫۰۷	۰٫۷	۰٫۵	-۰٫۱۲	-۰٫۴۲	۰٫۴۳	۰٫۰۴	-۰٫۲۶	۰٫۵۹	۰٫۰۳	۰٫۴۹	۱



شکل ۹ نمودارهای پراکنش عناصر در کانسنگ یال شرقی کانسار مهدی‌آباد.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.1.8.2]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.1.103]

همبستگی عناصر سرب و روی با گوگرد به ترتیب ۰٫۶۲۸ و ۰٫۳۱۶ است. این اعداد نیز تایید کننده اثر بیشتر فرایند اکسایش بر عنصر روی هستند. به نظر می‌رسد که شستشوی روی از محیط و در مرحله بعد، تشکیل کانی‌های کربناتی روی، در مقایسه با سرب بیش‌تر بوده است. سرب در پهنه اکسایشی به صورت کانی سولفاتی سروزیت و به مقدار کم گالن حضور داشته و از این رو، همبستگی بیش‌تری با گوگرد دارد. نقره دارای ضریب همبستگی مثبت با عناصر باریم، منگنز، سرب و گوگرد است که از این میان، بیش‌ترین همبستگی را با عناصر سرب (۰٫۵۲۴)، گوگرد (۰٫۶۱۴) و منگنز (۰٫۵۵۸) نشان می‌دهد. همبستگی میان عنصر نقره با سرب در این بخش از کانسار ضعیف است (شکل ۹ پ)، در حالیکه در سایر بخش‌های کانسار همبستگی مثبت بالایی دارد (۰٫۹۹۳، در بخش سولفیدی تپه سیاه) که به احتمال بسیار در اثر فرایندهای برونزایی است. همبستگی باریم با استرانسیم در همه بخش‌های کانسار به ویژه پهنه کانسنگ یال شرقی بسیار بالاست (۰٫۹۷۱؛ شکل ۹ ت). حضور پررنگ کانی باریت در کانسار و جانشینی Sr^{+2} (با شعاع یونی ۱٫۱۸ آنگستروم) به جای Ba^{+2} (با شعاع یونی ۱٫۳۵ آنگستروم) در این کانی، می‌تواند دلیل همبستگی بالای Sr با دو عنصر Ba و S باشد [۲۱،۲۰]. همچنین مس دارای ضریب همبستگی مثبت نه چندان قوی با عناصر گوگرد، باریم و استرانسیم است که از این میان، بیشترین همبستگی را با عنصر باریم (۰٫۷۱۹)، استرانسیم (۰٫۶۹۸) و گوگرد (۰٫۵۸۸) نشان می‌دهد. فراوان‌ترین کانی‌های ثانویه مس، آزوریت و مالاکیت هستند. در واقع، این دو کانی فراوان‌ترین کانی‌های مس‌دار در نمونه‌های سطحی کانسار مهدی‌آباد هستند که بر اثر اکسایش کالکوپیریت ایجاد شده‌اند [۶].

منگنز بیشترین همبستگی را با عنصر آهن (۰٫۹۱۰) نشان می‌دهد (شکل ۹ ث). منگنز در این بخش از کانسار بیشتر به صورت کانی کالکوفانیت با فرمول ($(Zn,Fe,Mn)Mn_3O_7.3H_2O$) دیده می‌شود. در این کانی، عناصر آهن و روی جانشین بخشی از منگنز شده‌اند. همبستگی مثبت میان منگنز و آهن به دلیل خاستگاه مشترک این دو عنصر و وجود کانی‌های کالکوفانیت و اکسید و هیدروکسیدهای آهن (هماتیت، گوتیت و لیمونیت) در کنار هم در پهنه کانسنگ یال شرقی کانسار است. برقراری شرایط اکسایش در بخش‌های سطحی کانسنگ یال شرقی باعث تبدیل پیریت به گوتیت و هماتیت می‌شود.

در پهنه کانسنگ یال شرقی کانسار مهدی‌آباد، میان عناصر Al و Si, K, P, Ti, Ce, La, Li, Sc, Y, Zr همبستگی‌های مثبت بالایی (اغلب بیش از ۰٫۹) دیده می‌شود (شکل ۹ ج). این عناصر، عناصر خاکزاد هستند که در قالب کانی‌های مقاوم آواری چون زیرکن، مونازیت و کانی‌های رسی (ایلیت دی-اکتاهدر، موسکویت) حضور دارند. وجود ایلیت دو هشت وجهی که نوعی ایلیت آواری است [۲۳،۲۲] به همراه موسکویت با الگوی XRD نمونه‌های معدنی مهدی‌آباد تایید شده است.

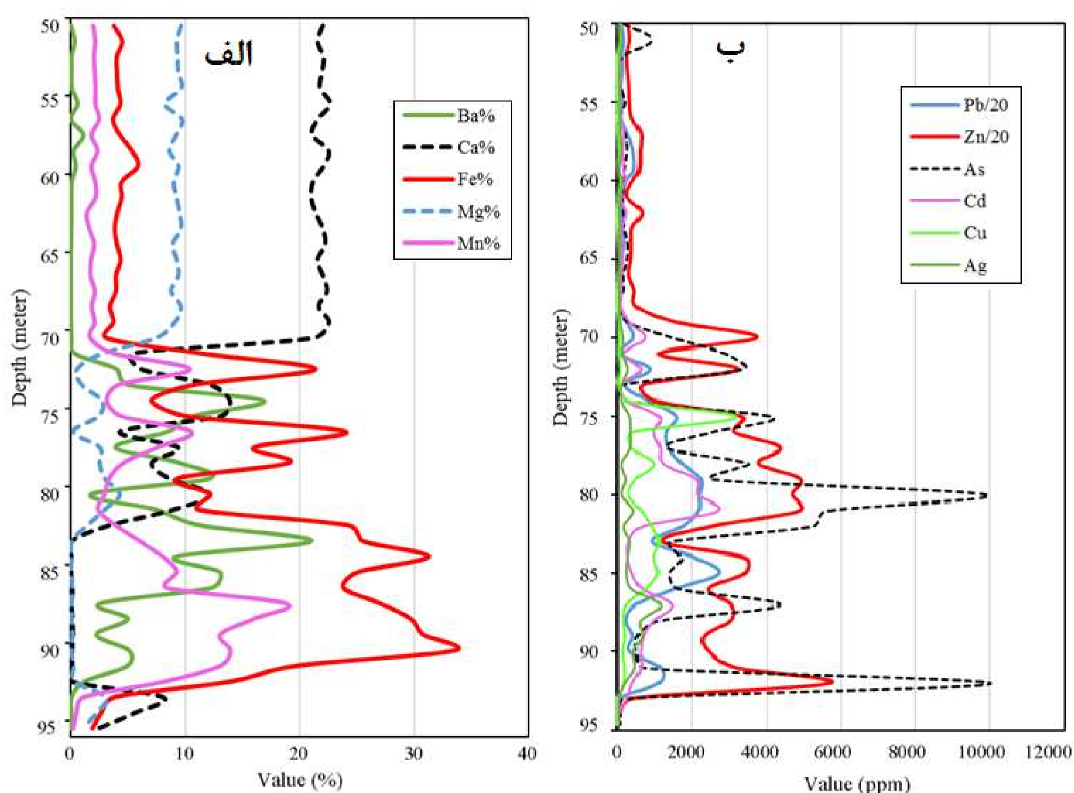
به طور کلی در پهنه کانسنگ یال شرقی، سه دسته از عناصر قابل تشخیص هستند، که می‌توانند خاستگاه متفاوتی داشته باشند. این سه گروه عبارتند از عناصر سازنده سنگ میزبان (Ca و بخشی از Mg) با خاستگاه رسوبی-شیمیایی و درونزادی، عناصر کانسنگ ساز (Pb، Zn، Cd، Ag، S، Ba، Sr به همراه Fe، Mn و عناصر کمیاب وابسته) با خاستگاه گرمابی و عناصر مقاوم (Al، Si و K به همراه عناصر با شدت میدان بالا، HFSE) با خاستگاه احتمالی آواری.

تغییرات عناصر با عمق

در شکل‌های ۹ الف و ب، تغییرات برخی عناصر اصلی و کمیاب در گمانه منتخب ۹۶۲۳ از پهنه کانسنگ یال شرقی رسم شده است. بررسی توزیع این عناصر نشان می‌دهد که کانه‌زایی در سنگ میزبان دولومیتی و از عمق حدود ۷۰ متری به بعد صورت گرفته است. بالاتر از این عمق، مقدار کلسیم و منیزیم بالاست (به ترتیب حدود ۲۲٪ و ۹٪). با ورود به پهنه کانه‌زایی، مقدار کلسیم و منیزیم کاهش یافته و مقدار سایر عناصر مورد بررسی در این نمودارها افزایش می‌یابد. آهن از حدود ۴٪ در خارج از منطقه کانه‌زایی به ۳۴-۲۲٪ و منگنز از حدود ۲٪ به به ۱۹ درصد می‌رسد (شکل ۱۰ الف). در منطقه کانه‌زایی نوسان‌هایی نیز دیده می‌شود که همبستگی منفی عناصر کلسیم و منیزیم را با سایر عناصر به خوبی نشان می‌دهد. الگوی توزیع این عناصر در این کانسار بسیار شبیه با کانسار ایرانکوه [۲۴] است.

افزایش مقدار Zn از حدود ۰٫۸٪ در سنگ میزبان دولومیتی به ۱۱٪ (میانگین ۶٪) در پهنه کانه‌زایی می‌رسد (شکل ۱۰ ب). افزایش As از بقیه عناصر بیشتر است و نوسان‌های شدیدتری را نیز نشان می‌دهد. میانگین غلظت این عنصر در خارج از منطقه کانه‌زایی ۱۹ پی‌پی‌ام است که با ورود به پهنه کانه‌زایی به ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام نیز می‌رسد. با توجه به ضریب غنی‌شدگی بالا در پهنه کانه‌زایی، آرسنیک می‌تواند به عنوان ردیاب کانه‌زایی روی-سرب در منطقه عمل کند.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.1.8.2]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.1.103]



شکل ۱۰ الف) تغییرات عناصر Ba, Ca, Mg, Fe , Mn و ب) عناصر Pb, Zn, As, Cd, Cu, Ag نسبت به عمق در سنگ میزبان آهک دولومیتی و پهنه کانی‌سازی در گمانه منتخب ۹۶۲۳ از پهنه کانسنگ یال شرقی کانسار مهدی‌آباد.

محیط زمین‌ساختی و مدل زایشی کانسار مهدی‌آباد

کانسارهای سرب و روی با میزبان کربناتی بیشتر در نواحی در ارتباط با کافت یا کرانه آرام صفحه‌های زمین‌ساختی تشکیل شده‌اند [۲۵]. کانسارهای نوع دره می‌سی‌سی‌پی در سنگ‌های کربناتی (دولومیتی، آهکی) واقع در سکوی بدون تغییر شکل، که در بخش رو به خشکی حوضه‌های در ارتباط با کوهزایی شکل می‌گیرند، یافت می‌شوند. دمای تشکیل این کانسار ۱۰۰ تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد و عمق تشکیل آن ۱۵۰-۲۰۰ متر گزارش شده است [۲۶] که با دما و عمق تشکیل کانسارهای نوع دره می‌سی‌سی‌پی همخوانی دارد. براساس بررسی سیال-های درگیر [۲۷] در کانی باریت، دمای تشکل این کانی ۱۰۵ تا ۲۶۱ درجه سانتیگراد با شوری ۰/۰۳ تا ۱۹/۴۴ درصد وزنی معادل نمک‌طعام است که با دما و شوری تشکیل سایر کانسارهای MVT چون کانسارهای دره‌زنجیر، راونج و خانه‌سورمه [۲۸-۳۰] همخوانی دارد. از سوی دیگر، مقدار کادمیوم در اسفالریت‌های کانسار مهدی‌آباد ۱۱۰۰ تا ۶۳۰۰ پی‌پی‌ام به دست آمده است [۲۷] که با مقدار بالای کادمیوم در کانسارهای MVT همخوانی دارد. مقدار کادمیوم در اسفالریت‌های کانسارهای سولفید توده‌ای کمتر از ۱۵۰۰ پی‌پی‌ام و در کانسارهای سدکس کمتر از ۲۰۰۰ پی‌پی‌ام بوده، در حالیکه در کانسارهای MVT بیش از ۲۰۰۰ پی‌پی‌ام است [۱۹]. فراوانی Cd در اسفالریت‌های مهدی‌آباد از فراوانی این عنصر در اسفالریت‌های دره زنجیر (۲۵۰۰ پی پی ام، [۲۸]) نیز بیشتر است.

سنگ میزبان این کانسارها در ایران اغلب دارای سن تریاس و کرتاسه هستند [۳۱]. وجود سنگواره‌های روزانه داران دریابن از جمله اربیتولین‌ها در سازند تفت، بیانگر محیط تشکیل کم‌عمق، گرم و نورانی است. این امر نشاندهنده تشکیل این سازند در کرانه آرام سکوی قاره‌ای است. به نظر می‌رسد که رخداد فاز کششی سیمرین پیشین در کرتاسه پیشین که منجر به تشکیل حوضه‌های رسوبی اغلب کربناتی در ایران مرکزی شده است [۱۱]، سنگ میزبان مناسب را برای تشکیل این کانسارها فراهم آورده باشد. شیل‌های موجود در منطقه (به سن

ژوراسیک تا کرتاسه) می‌توانند خاستگاه مناسبی برای فلزهای کانه‌زا باشند که نیاز به بررسی‌های دقیق‌تر دارد.

وجود سنگ میزبان دولومیتی، دگرسانی دولومیتی، حضور دولومیت‌های زین اسبی با سطوح بلوری خمیده و رخ، بافت پرکننده فضای خالی و جانشینی و ارتباط با گسل از ویژگی‌های تقویت کننده نوع دره می‌سی‌سی‌پی برای این کانسار است. این ویژگی‌ها در سایر کانسارهای نوع MVT در ایران چون ایرانکوه [۲۴] و کانسارهای ناحیه تفت [۱۱] نیز وجود دارد. البته، شواهدی از کانه‌زایی همزاد در مرز بالایی سازند تخریبی سنگستان دیده شده است که بر این اساس، برخی پژوهشگران این کانسار را از نوع سدکس در نظر گرفته‌اند. با این وجود، حجم اصلی کانه‌زایی در سنگ آهک دولومیتی و به صورت روزادی و پرکننده فضای خالی تشکیل شده است. ویژگی‌های زمین شیمیایی کانسار نیز نشاندهنده خاستگاه متفاوت عناصر Zn، Pb، Ag، Cd، Ba، S، Fe و Mn با عناصر سازنده هر دو سازند سنگستان و تفت است. عناصر فلزی نام برده هم با عناصر آواری (Si، Al و سایر عناصر مقاوم) و هم با عناصر سازنده سنگ میزبان (Ca و Mg) همبستگی منفی دارند.

براساس همه مطالب بیان شده، می‌توان خاستگاه بخش اصلی کانسار مهدی‌آباد را MVT در نظر گرفت، ولی در بخش‌های با کانه‌زایی همزاد، خاستگاه سرب و روی رسوبی برون‌دمی (سدکس) نیز ممکن است.

برداشت

بر پایه بررسی‌های انجام شده بر پهنه کانسنگ یال شرقی مهدی‌آباد، موارد زیر نتیجه گرفت شد:

۱- کانسار سرب و روی مهدی‌آباد در کرانه آرام صفحه‌های قاره‌ای (سکوی قاره‌ای) و در سنگ میزبان کربناتی – دولومیتی سازند تفت به سن کرتاسه پیشین تشکیل شده است. وجود سنگواره‌های روزنه داران دریابن بزرگ از جمله اربیتولین‌ها، بیانگر محیطی کم‌عمق، گرم و نورانی است.

۲- دگرسانی‌های دولومیتی، آنکریتی و سیدریتی پیش از کانه‌زایی رخ داده است. ماهیت رگه‌ای این دگرسانی‌ها گویای فعالیت سیال‌های گرمابی آهن‌دار است. این دگرسانی‌ها با افزایش حفره‌ها در سنگ میزبان، زمینه را برای کانه‌زایی روی-سرب مهیا کرده‌اند.

۳- در پهنه کانسنگ یال شرقی، کانسنگ بیشتر از نوع اکسیدی بوده و از کانه‌های اصلی هیدروزینسیت، اسمیت‌زونیت، همی‌مورفیت و کالکوفانیت تشکیل شده است. در نمونه‌های بررسی شده، کانسنگ سولفیدی دیده نشد. در اثر هوازدگی و فعالیت‌های برونزایی، کانی‌های سولفیدی اسفالریت و گالن به کانی‌های غیرسولفیدی همی‌مورفیت و هیدروزینسیت تبدیل شده‌اند. کانه‌زایی بیشتر به صورت دیرزاد و چینه‌کران (باند) و دارای بافت‌های جانشینی در سنگ میزبان کربناتی، رگه‌ای و پر کننده فضای خالی است. گسل‌های ناحیه (به ویژه گسل تپه سیاه) می‌توانند با کانه‌زایی در ارتباط باشند.

۴- بر اساس ماتریس همبستگی عناصر، سه گروه از عناصر در پهنه کانسنگ یال شرقی قابل تشخیص هستند که عبارتند از عناصر تشکیل‌دهنده سنگ میزبان (Ca و بخشی از Mg) با خاستگاه رسوبی-شیمیایی و درونزاد، عناصر کانسنگ ساز (Pb، Zn، Cd، Ag، S، Ba، Sr به همراه Fe و Mn) با خاستگاه گرمابی و عناصر مقاوم (Al، Si و K به همراه HFSEها) با خاستگاه احتمالی آواری (کانی‌های رسی). الگوی تغییرات عناصر با عمق نیز تایید کننده این گروه‌بندی است.

۵- نتایج بررسی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و زمین شیمی منطقه و وجود سنگ میزبان دولومیتی، دگرسانی دولومیتی، حضور دولومیت‌های زین اسبی با سطوح بلوری خمیده و رخ، بافت پرکننده فضای خالی و جانشینی و ارتباط با گسل تاییدکننده خاستگاه نوع دره می‌سی‌سی‌پی برای پهنه کانسنگ یال شرقی کانسار سرب – روی – باریت (مس – نقره) مهدی‌آباد است.

قدردانی

نویسندگان لازم می‌دانند که از مدیریت و کارشناسان معدنی شرکت پیشگامان صنعت سرب و روی مهدی‌آباد برای مهیا کردن امکان بازدید، بررسی‌های صحرایی، نمونه‌برداری و دسترسی به گزارش‌های معدنی و داده‌های زمین‌شیمیایی، قدردانی نمایند.

مراجع

[1] Ahadi M., Alenabi R., Tavousi M. J., *"The report of revision in mineral resource estimate of Mehdiabad lead, zinc and barite deposit"*, (2016).
[2] IMIDRO. *"Mehdiabad lead and zinc mine on development path"*, (2016).

of the Irankuh Mountain Range, Esfahan, West Central Iran", Ph.D. Thesis. (1981).

[15] Ghazban F., McNutt R. H., Schwarcz H. P., *"Genesis of sediment-hosted Zn-Pb-Ba deposits in the Irankuh district, Esfahan area, west-central Iran"*, Economic Geology 89 (1994) 1262–1278.

[16] Rao C. P., Adabi M. H., *"Geochemistry of gold-bearing carbonates, Beaconsfield gold mine, Tasmania, Australia"*, Carbonates and Evaporites 15 (2000) 7.

[17] Garrels R. M., Christ C. L., "Solutions, Minerals and Equilibria", (1965).

[18] Ellwood B. B., Burkart B., Rajeshwar K., Darwin R. L., Neeley R. A., McCall A. B., et al., *"Are the iron carbonate minerals, ankerite and ferroan dolomite, like siderite, important in paleomagnetism?"*, Journal of Geophysical Research: Solid Earth 94 (1989) 7321–7331.

[19] Schwartz M. O., *"Cadmium in zinc deposits: economic geology of a polluting element."* International Geology Review: 42 (2000) 445–69.

[20] Mason B., Moore C. B., *"Principles of geochemistry"*, New York: Wiley and Sons; (1985).

[21] Wells A. F., *"Structural inorganic chemistry"*, Oxford university press; (2012).

[22] Ji J., Chen J., Lu H., *"Origin of illite in the loess from the Luochuan area, Loess Plateau, Central China"*, Clay Minerals 34 (1999) 525–532.

[23] Setti M., Marinoni L., Lopez-Galindo A., *"Mineralogical and geochemical characteristics (major, minor, trace elements and REE) of detrital and authigenic clay minerals in a Cenozoic sequence from Ross Sea, Antarctica"*, Clay Minerals 39 (2004) 405–421.

[24] Karimpour M. H., Malekzadeh Shafaroudi A., Esmaeili S. A., Shabani S., *"Mineralogy and geochemical varations of altered host rock in Irankuh Pb-Zn mining district, SW Isfahan"*, Journal of Advanced Applied Geology 8 (2019) 1–16.

[25] Sawkins F. J., *"Metal deposits in relation to plate tectonics"*, vol. 17. Springer Science & Business Media; (2013).

[26] Morshedy A. H., Mojtahedzadeh S. H., Kouhsari A. H., *"Geometrical modeling of fluid inclusion to predict the microthermometric properties: a case study at the Mehdiabad Pb-Zn deposit"*, Journal of Economic Geology 11 (2019) 147–167.

[27] Karimzadeh, Z. Mehrabi, B. Bazargani-Guilani, K., "*Mineralization and Formation of the*

[3] Nabavi M. H., *"Yazd 1:250, 000 quadrangle geological map"*, Geological Survey of Iran (1972).

[4] Reichert J., Borg G., Rashidi B., *"Mineralogy of Non - sulfide ore from the Mehdi abad zinc - lead deposit, Central Iran"*, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 11 (2003) 209–217.

[5] Ghasemi M., Mohammadzadeh M., Yaghubpur A., Mirshokraei A. A., *"Mineralogy and Textural Studies of Mehdiabad Zinc-Lead Deposit- Yazd, Central Iran"*, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 16 (2008) 389–404.

[6] Ghasemi M., Momenzadeh M., Yaghubpur A., Mirshokraei A. A., *"Mineralogy Studies of Mehdiabad Zinc-Lead Deposit- Yazd, Central Iran"*, Journal of Geoscience 19 (2010) 89–98.

[7] Pourfaraj H., Maghfouri S., Mohajel M., Rastad E., *"The role of normal fault in mineralization and change of the mechanism in Mehdiabad mine, Yazd"*, 33th Symposium of Geosciences, Tehran, Iran (2016).

[8] Maghfouri S., Hosseinzadeh M. R., Rajabi A., Choulet F., *"A review of major non-sulfide zinc deposits in Iran"*, Geoscience Frontiers 9 (2018) 249–272.

[9] Maghfouri S., Hosseinzadeh M. R., Choulet F., Alfonso P., Azimzadeh A. M., Rajabi A., *"Vent-proximal sub-seafloor replacement clastic-carbonate hosted SEDEX-type mineralization in the Mehdiabad world-class Zn-Pb-Ba-(Cu-Ag) deposit, southern Yazd Basin, Iran"*, Ore Geology Reviews 113 (2019) 103047.

[10] Rajabi A., Rastad E., Canet C., *"Metallogeny of Cretaceous carbonate-hosted Zn–Pb deposits of Iran: geotectonic setting and data integration for future mineral exploration"*, International Geology Review 54 (2012) 1649–1672.

[11] Ghorbani M., *"Economic geology of Iran"*, vol. 581. Springer; (2013).

[12] Whitney D. L., Evans B. W., *"Abbreviations for names of rock-forming minerals"*, American Mineralogist 95 (2010) 185–187.

[13] Xu F., You X., Li Q., Liu Y., *"Can Primary Ferroan Dolomite and Ankerite Be Precipitated? Its Implications for Formation of Submarine Methane-Derived Authigenic Carbonate (MDAC) Chimney"*, Minerals 9 (2019) 413.

[14] Rastad E., *"Geological, Mineralogical, and Ore Facies Investigations on the Lower Cretaceous Stratabound Zn-Pb (Ba-Cu-) Deposits*

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.1.8.2]

[DOI: 10.52547/ijcm.30.1.103]

Zn-Pb-Ba-(Cu-Ag) deposit, Iran; constraints from geochemistry, fluid inclusions, and OC-Sr isotopes", Journal of Asian Earth Sciences 207 (2021) 104654.

[30] Nejadhadad, M. Taghipour, B. Zarasvandi, A. Karimzadeh Somarin, A., *"Geological, geochemical, and fluid inclusion evidences for the origin of the Ravanj Pb-Ba-Ag deposit, north of Delijan city, Markazi Province, Iran"*, Turkish Journal of Earth Sciences 25 (2016) 179–200.

[31] Ghorbani M., Tajbakhsh P., Khoie N., *"Lead and zinc deposits in Iran"*, (2000).

Khan-e Sourmeh Pb-Zn Deposit (West of Isfahan) Based on Mineralogy, Geochemistry and Fluid Inclusion Evidences", Advanced Applied Geology 5 (2015) 72–84.

[28] Maghfouri, S. Hosseinzadeh, M. R. Rajabi, A. Azimzadeh, A. M., *"Darreh-Zanjir deposit; a typical carbonate hosted Zn-Pb deposit (MVT) in Early Cretaceous sedimentary sequence, Southern Yazd basin"*, Geosciences. 26 (2017) 13–28.

[29] Maghfouri, S. Hosseinzadeh, M. R., Lentz, D. R. Tajeddin, H. A. Movahednia, M. Shariefi, A., *"Nature of ore-forming fluids in the Mehdiabad world-class sub-seafloor replacement SEDEX-type*

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.1.8.2]

[DOI: 10.52547/ijcm.30.1.103]